

Section 2

ENVIRONMENTAL (CORROSIVE MEDIUM, TEMPERATURE, LOADING WAVEFORM, ETC.) EFFECTS ON THE FATIGUE CRACK PROPAGATIONPHYSICAL

Секція 2

РОЗВИТОК ВТОМНИХ ТРІЩИН ІЗ УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ КОРОЗІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА, ТЕМПЕРАТУРИ, ВИДУ НАВАНТАЖЕННЯ ТА ІНШИХ ФАКТОРІВ

ВЛИЯНИЕ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

А.И. Духота, М.В. Киндрачук, В.Ф. Лабунец

THE INFLUENCE OF FRETTING-CORROSION ON THE FATIGUE STRENGTH OF TITANIUM ALLOYS

A.I. Dukhota, M.V. Kindrachuk, V.F. Labunets

Национальный авиационный университет, Украина

Abstract The results of the executed researches of BT1-0, OT4, BT8, BT3-1 titanium alloys fretting-fatigue strength was represented. Influence of vibro-contact loading parameters, nature of the attended materials, level of initial strength and structure of alloys on the degree of their fatigue strength reduction under the action of fretting-corrosion was showed. Directions of the titanium alloys fretting-fatigue further researches was determined.

Актуальность вопроса.

Титановые сплавы находят широкое применение в различных отраслях техники благодаря, прежде всего, их высокой удельной прочности и коррозионной стойкости. Однако, независимо от системы легирования, структуры, уровня прочности и твердости сплавы на основе титана имеют низкие триботехнические свойства и склонны к схватыванию и налипанию при трении [1–3]. По этой причине считается невозможным применение титановых сплавов в узлах трения без определенной упрочняющей поверхностной обработки или защитного покрытия.

Вместе с тем, анализ состояния деталей современных машин, в первую очередь авиационной техники, показывает, что имеется значительное количество деталей из титановых сплавов, которые выходят из строя из-за поверхностного или объемного разрушения вследствие развития в сопряжении фреттинг-коррозии [4; 5].

Необходимым условием возникновения фреттинг-коррозии, как известно [4], является относительное циклическое микроперемещение контактирующих поверхностей. Такое перемещение может возникать в результате знакопеременного нагружения детали. В этом случае фреттинг-коррозия приводит не только к износу, но и к более быстрому усталостному разрушению.

Результаты экспериментов и их обсуждение.

С целью оценки влияния основных факторов, определяющих интенсивность развития фреттинг-коррозии, а также факторов, определяющих общий уровень усталостной прочности титановых сплавов, на их разупрочнение при фреттинг-усталости, проведены усталостные испытания образцов из различных титановых сплавов с предварительным нанесением на рабочую поверхность фреттинг-повреждения и при одновременном сочетании фреттинга с объемным циклическим нагружением по специальной методике. При раздельных испытаниях варьировалась удельная контактная нагрузка, амплитуда относительного перемещения, количество циклов фреттинга. При испытании по комбинированной методике применялись накладки из различных материалов и образцы с различной структурой, полученной путем термической обработки. В комплексе такая методика проведения эксперимента позволила определить влияние параметров виброконтактного нагружения, природы сопряженных материалов и структуры сплавов на степень снижения их усталостной прочности в результате разупрочняющего действия фреттинг-коррозии.

На рис. 1 приведены результаты, полученные при испытании сплавов, имеющих различный исходный уровень усталостной прочности. Как видно, степень снижения предела усталости под действием фреттинг-коррозии повышается с увеличением исходной прочности сплава. При принятых условиях нагружения $\sigma_{-1}^{\Phi}/\sigma_{-1}$ снижается от 0,87 для сплава ВТ1-0, имеющего наименьшую прочность, до 0,64 для ВТ8 – одного из наиболее высокопрочных титановых сплавов.

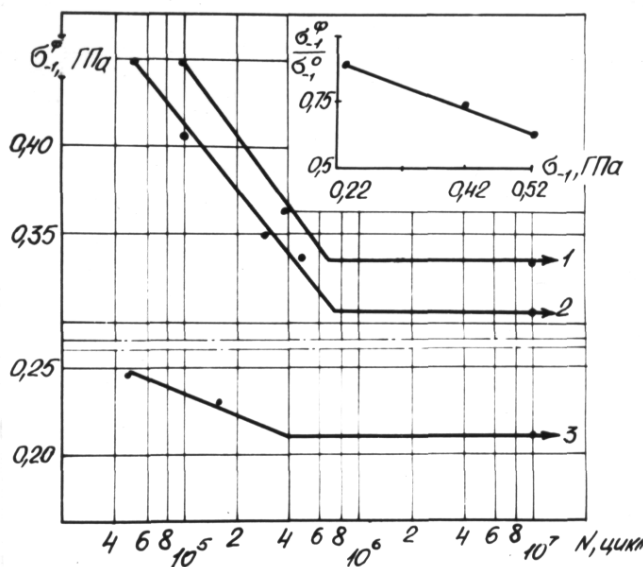


Рис. 1. Диаграмма выносливости сплавов ВТ8 (1), ОТ4 (2), ВТ1-0 (3) и изменение степени их разупрочнения при фреттинг-усталости в зависимости от исходной величины предела усталости (испытание по раздельной методике с предварительным нанесением на рабочую поверхность образцов фреттинг-повреждений: $P = 19,6$ МПа; $A = 125$ мкм; $\nu = 25$ Гц; $T = 293$ К; $N = 2 \cdot 10^5$ цикл. Материал накладок - сталь 45, термообработанная на твердость $H_V = 5,9$ ГПа).

Влияние фреттинг-коррозии на усталостную прочность металлов определяется, в основном, двумя факторами [4; 6]. Во-первых, образованием в поверхностном слое субмикро- и микротрещин, развитие которых под действием объемной циклической нагрузки вызывает в конечном счете разрушение. Во-вторых, возникновение в месте

фреттинг-повреждения концентрации напряжений вследствие износа и повышения шероховатости поверхности. Действие этих факторов, как правило, суммируется. Более высокую чувствительность к повреждению фреттинг-коррозией сплавов с большей прочностью, в этом случае, можно объяснить большей чувствительностью их к концентрации напряжений, а также увеличением скорости распространения фреттинговых трещин при увеличении действующей динамической нагрузки.

О развитии разрушения от локальных поверхностных объемов, расположенных в зоне фреттинг-повреждения, свидетельствует направление распространения усталостных трещин (рис. 2). На поверхности изломов при фрактографическом исследовании наблюдается несколько зон, характерных обычно для фреттинг-усталости [7].

1 - зона наклонного распространения фреттинговой трещины;

2 - зона распространения трещины перпендикулярно оси образца;

3 - зона статического долома.

Распространение трещин в каждой из этих зон происходит при разном напряженно-деформируемом состоянии, что проявляется в изменении микрорельефа поверхности излома.

Удельная контактная нагрузка и амплитуда относительного перемещения при их изменении в пределах $P = 9,8...29,4$ МПа и $A = 50...200$ мкм существенно не влияют на величину предела усталости, определяемого по результатам испытаний образцов с предварительным нанесением на рабочую поверхность фреттинг-повреждений. Снижение темпа падения усталостной прочности сплавов ВТ8 и ВТЗ-1 при увеличении удельной нагрузки свыше 50 МПа при амплитуде фреттинга $A = 11$ мкм и незначительное его изменение при амплитудах, превышающих 10 мкм, отмечено также в работе [8].

Согласно данным [8], наиболее значительное падение предела усталости происходит при повышении удельного давления до 10 МПа и амплитуды относительного перемещения до 10 мкм. Их дальнейшее увеличение, хотя и сопровождается увеличением силовой нагруженности поверхностных микрообъемов металла в зоне контакта, однако, по-видимому, не вызывает их качественно новой структурной повреждаемости.

Зарождение поверхностных субмикро- и микротрещин происходит уже на раннем этапе фреттинг-коррозии. Об этом свидетельствует резкое падение усталостной долговечности на начальной стадии формирования фреттинг-повреждения (рис. 3). После $N = 5 \cdot 10^4$ циклов фреттинга, несмотря на увеличение глубины повреждения (износа), остаточная долговечность при испытании с постоянным напряжением существенно не изменяется.

Таким образом, можно заключить, что влияние параметров, определяющих интенсивность развития фреттинг-коррозии - нагрузки, амплитуды относительного перемещения, количества циклов фреттинга на выносливость и циклическую прочность титановых сплавов при фреттинг-усталости, определяется стадией зарождения усталостной трещины и мало зависит от величины износа.

На рис. 4 приведена диаграмма выносливости сплава ВТ8 при комбинированных испытаниях на фреттинг-усталость в одноименной паре, в паре с бронзой БрАЖ9-4, дюралюминием Д16Т, сталью 45. Как видно, по степени снижения усталостной долговечности титанового сплава при напряжениях, лежащих выше точек 0, 0', материалы располагаются в следующей последовательности:

БрАЖ9-4 → Д16Т → сталь 45 → ВТ8.

При напряжениях, лежащих ниже точек 0, 0', по степени снижения предела усталости (на базе $5 \cdot 10^6$ цикл.) материалы располагаются в такой последовательности:

Д16Т → БрАЖ9-4 → ВТ8 → сталь 45.

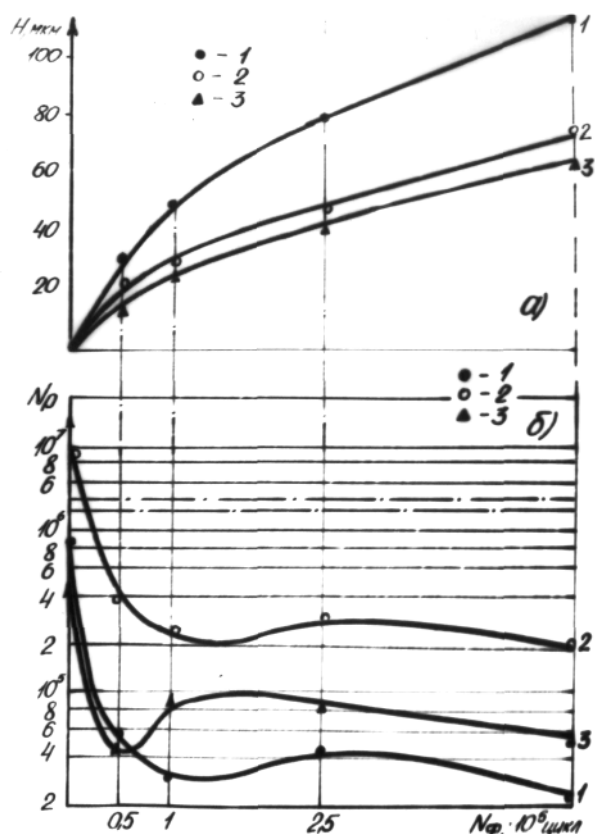


Рис.3. Зависимость величины износа (а) и остаточной долговечности образцов (б) от количества циклов виброн нагружения при предварительном нанесении на рабочую поверхность фреттинг-повреждений: 1 – ВТ8; 2 - ВТ1-0; 3 - ОТ4. Испытания в паре со сталью 45 при 2 - $P = 19,6$ МПа; $A = 150$ мкм; 2,3 - $P = 19,6$ МПа; $A = 100$ мкм; $\nu = 25$ Гц; $T = 293$ К.

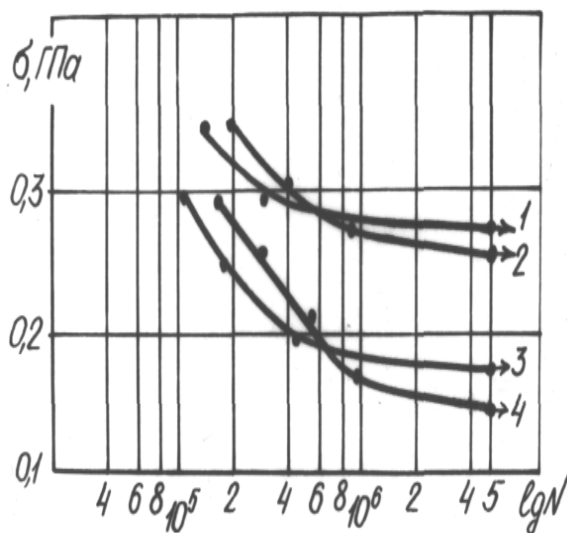


Рис. 4. Диаграмма выносливости сплава ВТ8 при комбинированных испытаниях на фреттинг-усталость в паре со сплавом Д16Т (1), бронзой БрАЖ9-4 (2), сплавом ВТ8 (3) и сталью 45 (4).

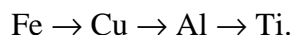
Сопоставление полученных данных с данными по износу показывает, что влияние природы сопряженных материалов на фреттинг-усталость и износ сплава ВТ8 не одинаково. Так, при напряжениях, лежащих ниже точки 0, усталостная долговечность при испытании в паре со сталью 45 выше, чем в одноименной паре, в то время как интенсивность изнашивания в одноименной паре значительно ниже. В паре со сплавом Д16Т износ титанового сплава выше, чем в паре с бронзой, однако степень снижения предела усталости в паре с Д16Т меньше. Следует отметить, что при контактировании с бронзой и сплавом Д16Т усталостная прочность титанового сплава, в целом, значительно выше, чем в одноименной паре и в паре со сталью 45.

Бронза БрАЖ9-4 и сплав Д16Т по сравнению со сплавом ВТ8 имеют более низкую твердость. Поэтому основной объем повреждения при их взаимодействии приходится не на титановый сплав, а на материал накладки, что хорошо согласуется с ранее описанным характером разрушения контактирующих поверхностей. При испытаниях в одноименных парах повреждения распределяются поровну между образцом и накладкой, а в паре со сталью 45, твердость которой значительно выше, преимущественно на титановом сплаве.

Различное влияние природы сопряженных материалов на фреттинг-усталость при разном уровне циклического нагружения можно объяснить различным механизмом зарождения усталостных трещин. При напряжениях, лежащих выше точек 0, 0', за усталостное разрушение, по-видимому, ответственны адгезионные процессы,

развивающиеся в результате разрушения естественной окисной пленки на пятнах фактического контакта и приводящие к образованию усталостных трещин, способных к дальнейшему развитию уже в начальный период фреттинга.

В пользу высказанного предположения говорит то, что степень снижения усталостной долговечности титанового сплава имеет определенную связь с его склонностью к схватыванию с материалом накладки, которая может быть оценена по разности параметров кристаллической решетки металлов, являющихся основой исследуемых сплавов [9; 10]. В порядке уменьшения разности параметров кристаллической решетки с титаном металлы располагаются в следующей последовательности:



В этом же направлении в группе материалов БрАЖ9-4, сплав Д16Т и сплав ВТ8, сталь 45 уменьшается степень снижения усталостной долговечности титанового сплава.

При напряжениях, лежащих ниже точек 0, 0', повреждения, образующиеся в результате разрушения адгезионных связей в начальный период фреттинга, вероятно, недостаточны для развития их в магистральную трещину. Разрушение в этих условиях, по-видимому, начинается на более позднем этапе фреттинга, когда между сопряженными поверхностями образуются более прочные адгезионные связи в результате развития диффузии или появятся достаточные коррозионные повреждения. Интенсивность схватывания зависит от времени непрерывного контактирования и скорости диффузии. Последняя пропорциональна контактной разности потенциалов между сопряженными материалами, которая, в свою очередь, определяется расположением металлов в ряду Вольты и уменьшается в направлении $\text{Ti} - \text{Al} \rightarrow \text{Ti} - \text{Fe} \rightarrow \text{Ti} - \text{Cu} \rightarrow \text{Ti} - \text{Ti}$. В этом же направлении снижается предел усталости при испытании титанового сплава в парах БрАЖ9-4, сплав Д16Т и сплав ВТ8, сталь 45. На существование связи между контактной разностью потенциалов и усталостной прочностью металлов при фреттинг-усталости впервые указано в работе [11].

Снижение степени падения предела фреттинг-усталости в указанном направлении можно объяснить также влиянием коррозионного фактора, действие которого определяется интенсивностью развития коррозионных процессов и, исходя из электрохимической природы фреттинг-коррозии [4], зависит от разности электродных потенциалов и электрохимической активности контактирующих материалов.

Определение взаимосвязи фреттинг-усталостной прочности со структурой и видом термической обработки проводилось на сплаве ВТ3-1 при комбинированных испытаниях в паре с БрАЖ9-4. Исследовались образцы в отожженном и термически упрочненном (закалка + старение) состоянии с равноосной и пластинчатой структурой. Режимы термической обработки, соответствующий им тип структуры и значение пределов усталости приведены в таблице 1.

Как видно, упрочняющая термическая обработка обеспечивает значительное повышение усталостной прочности титанового сплава как в условиях чистой усталости, так и при фреттинг-усталости. При фреттинг-усталости во всем диапазоне исследованных напряжений усталостная долговечность образцов с пластинчатой структурой выше, чем с равноосной (рис. 5). Так как твердость образцов после термической обработки, обеспечивающей получение равноосной и пластинчатой структуры, практически не отличалась, а прочность последних даже несколько ниже, можно предположить, что влияние структуры на фреттинг-усталость определяется не стадией зарождения усталостной трещины, а стадией ее распространения. Более высокую долговечность образцов с пластинчатой структурой, в этом случае, можно объяснить меньшей скоростью распространения усталостных трещин вследствие их ветвления, что приводит к увеличению фактической длины усталостных трещин и требует большей затраты энергии на разрушение [12]. Высказанное предположение

подтверждается данными фрактографического анализа усталостных изломов. Как видно из рис. 6, траектория распространения усталостных трещин у образцов с пластической структурой, в отличие от образцов с равноосной структурой, может резко изменяться даже в пределах одного зерна, что связано с изменением ориентировки пластин α - фазы.

Таблица 1

Режим термической обработки, соответствующий им тип структуры и значение пределов усталости сплава ВТЗ-1, при комбинированных испытаниях на фреттинг-усталость в паре с БрАЖ9-4

№ п/п	Режим термической обработки	Тип структуры	Предел усталости σ_{-1} , ГПа	Предел фреттинг-усталости, σ_{-1}^{ϕ} , ГПа	$\sigma_{-1}^{\phi}/\sigma_{-1}$
1.	Нагрев до 1173 К, 1 ч, перенос на 923 К, 2ч, воздух	Равноосная	50	25	0,5
2.	Нагрев до 1323 К, 1 ч, воздух + нагрев до 1173 К, 1 ч, перенос на 923 К, 2 ч, воздух	Пластинчатая	45	27,5	0,61
3.	Закалка с 1153 К в воде + старение на 923 К, 2ч, воздух	Равноосная	62	30	0,49

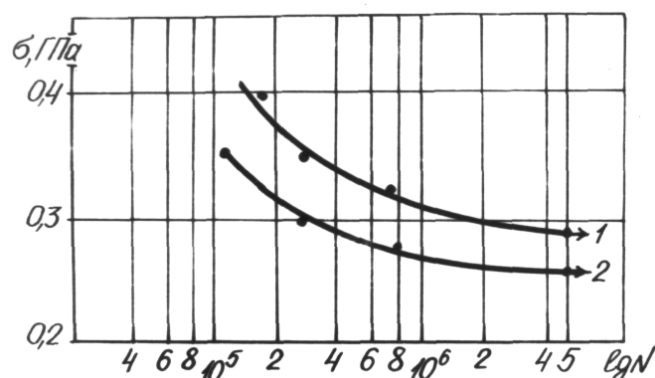
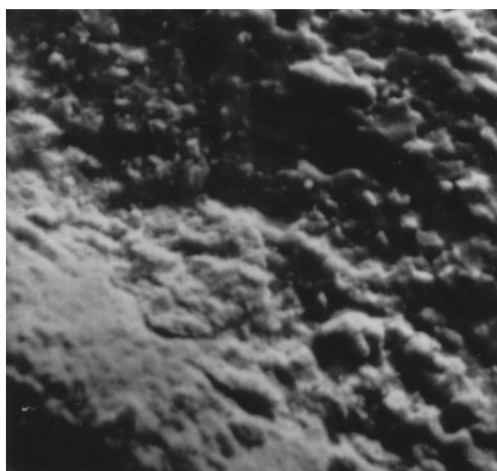
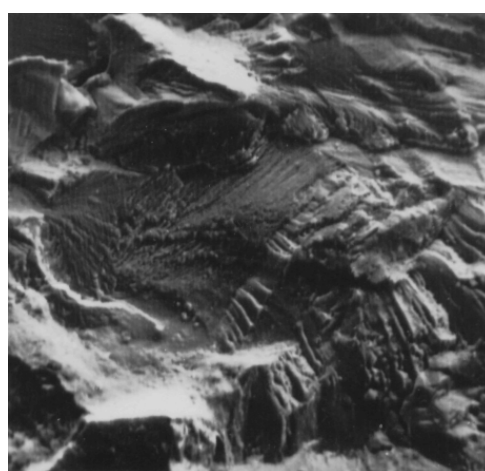


Рис. 5. Диаграмма выносливости сплава ВТЗ-1 с пластинчатой (1) и равноосной (2) структурой при комбинированных испытаниях на фреттинг-усталость в паре с БрАЖ9-4.



а)



б)

Рис. 6. Фрактограммы поверхности усталостного излома сплава ВТЗ-1 с равноосной (а, х910) и пластинчатой (б, х410) структурой при комбинированных испытаниях на фреттинг-усталость в паре БрАЖ9-4.

Выводы.

Таким образом, с точки зрения фреттинг-усталости для работы в паре с титановыми сплавами необходимо выбирать материалы с более низкой твердостью, имеющие низкую склонность к схватыванию, близкую к ним электроотрицательность и величину электродного потенциала. Для повышения усталостной прочности и долговечности деталей, при этом, целесообразно производить термическую обработку, позволяющую повысить общий уровень прочности сплава (закалка + старение), а также получить структуру с пластинчатыми выделениями α - фазы.

В заключение необходимо отметить некоторые наиболее важные направления дальнейших исследований фреттинг-усталости титановых сплавов:

1. Учитывая, что в качестве конструкционных в настоящее время используется большое количество титановых сплавов, а также постоянно разрабатываются новые сплавы со специальными свойствами и специального назначения, необходимо создание банка данных по фреттинг-усталости титановых сплавов.

2. Необходимо создание физической модели поверхностного и объемного разрушения при фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости с учетом специфики свойств, присущих сплавам на основе титана.

3. С точки зрения достижения оптимальных и наиболее высоких технологических и эксплуатационных показателей деталей, работающих в условиях фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости, важным является проведение и систематизация исследований фреттингостойкости новых современных технологий поверхностного упрочнения титановых сплавов с оценкой усталостной и фреттинг-усталостной прочности.

4. Так как в реальных условиях эксплуатации на детали действуют различные по характеру, величине и знаку напряжения с инженерной точки зрения необходимо знать влияние напряженного состояния на интенсивность изнашивания и долговечность при действии фреттинга и фреттинг-коррозии.

5. Известно, что практически все износостойкие защитные покрытия независимо от способа их получения приводят к значительному снижению усталостной прочности сплавов на основе титана. В этом направлении необходим поиск эффективных материаловедческих и технологических решений, которые обеспечили бы снижение степени отрицательного влияния покрытий на циклическую прочность материала основы.

В настоящее время в Национальном авиационном университете проводятся работы по всем выше указанным направлениям. На их основе уже решены ряд практических задач по повышению работоспособности и восстановлению титановых деталей, работающих в условиях фреттинг-коррозии

Литература

1. Радомисельский И.Д., Манукян Н.Н. Антифрикционные материалы на основе титана // Порошковая металлургия, 1984. – № 1. – С.80-90.
2. Состояние и перспективы использования антифрикционных покрытий на титановых сплавах / А.Ф. Аксенов, И.Е. Полищук, Э.А. Кульгавый, А.С. Синьковский // Трение и износ, 1982.- Т.3, № 3. – С. 422-427.
3. Трофимов В.А., Белецкий В.М. Обеспечение надежности и долговечности подвижных сочленений шасси, выполняемых из титановых сплавов технологическими методами // Технологические системы, 2002. – № 5. – СС. 56-65.
4. Голего Н.Л., Алебьев А.Я., Щевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. – К.: Техніка, 1974. – 268 с.
5. Малишкин В.В., Ходак Н.А., Дмитренко В.В., Лубяный В.В. Повышение сроков эксплуатации деталей авиационной техники путем восстановления размеров их геометрической формы и упрочнения газотермическим напылением жаростойкими покрытиями / В сб. трудов IV Международной научно-технической конференции АВИА-2002, К.: НАУ, 23-25 апреля, 2002. – том. 1. – С. 31.101-31.103.

6. Уотерхауз Р.Ф. Фреттинг-коррозия. – Ленинград: Машиностроение, 1976.- 270с.
7. Кулагин Н.С., Духота А.И., Свечников В.Л. Фрактографические особенности и диагностические признаки усталостных изломов, инициированных фреттингом / В сб. Перспективные методы восстановления деталей и узлов авиационной техники. – К.: КИИГА, 1989. – С. 24-28.
8. Петухов А.Н. Усталостная прочность металлов и элементов конструкции в условиях контактной коррозии трения / Проблемы прочности, 1972. – № 2. – С. 99-103.
9. Голего Н.Л. Схватывание в машинах и методы его устранения. – К.: Техніка, 1966. – 230 с.
10. Костецкий Б.И., Носовений И.Г. Процесс схватывания металлов и критерии его интенсивности / В сб.: Проблемы трения и изнашивания, 1972. – Вып. 2. – С. 74-77.
11. Степанов В.Н., Терентьев В.Ф. Влияние природы контактирующих металлов на циклическую прочность титанового сплава АТ-3 в условиях фреттинг-коррозии. – Физ. Хим. механика материалов, 1968. – № 1. – С. 90-92.
12. Влияние структуры сплава ВТЗ-1 на циклическую трещиностойкость / Вассерман Н.Н., Катков А.Ф., Томский В.С., Шишкина М.М.. – Физ.хим.механика материалов, 1982. – том 18. – № 4. – С. 92-94.